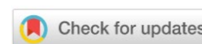
ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY





УДК 621.762.1
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-78-89

Научная статья



EDN: BXGSNL

Диффузионные процессы при формировании структуры легированных порошковых сталей

М.С. Егоров[1] ✉, **Р.В. Егорова**[1], **Ж.В. Еремеева**[2]
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Национальный исследовательский технический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация
✉ aquavdonsk@mail.ru

Аннотация
Введение. Производство легированных порошковых сталей остается одним из перспективных направлений отечественной порошковой металлургии, что объясняется высоким уровнем эксплуатационных свойств и широкой номенклатурой получаемых изделий. Формирование таких материалов с требуемыми свойствами является сложным процессом, сопровождающимся многообразными явлениями, особое место среди которых занимает диффузионное легирование железной основы порошковых сталей. Создание легированных порошковых сталей в системе Fe-NiO и Fe-Ni имеет важное значение в металлургии и металлообработке при процессах нанесения покрытий и спекания для получения материалов с требуемыми свойствами. В процессе термической обработки для улучшения свойств материалов рассматривается и диффузионное взаимодействие никеля в железе. В последнее время успехи в изучении взаимной диффузии связаны с исследованием однородных систем. Однако взаимная диффузия даже в монокристаллах всегда протекает в пространственно-неоднородных условиях. В современной литературе недостаточно исследована взаимная диффузия в двух- и многокомпонентных порошковых системах. Поэтому целью работы является определение влияния диффузионного легирования никелем и оксидом никеля порошковой стали на основе железа на процессы получения порошковых материалов. В рамках обозначенной цели поставили задачи — исследовать диффузионные процессы взаимодействия пар в системе Fe-NiO и Fe-Ni, технологические режимы спекания и восстановительный отжиг образцов для достижения максимальных механических характеристик, которые бы обеспечивали формирование качественного материала.
Материалы и методы. В работе использовался железный порошок марки ПЖРВ 2.200.26 производства ПАО «Северсталь» (г. Череповец) и карбонильный порошок никелевый ПНК-УТ3 ГОСТ 97922–97, получаемый электролитическим методом или путем расщепления никелевой соли водным раствором. Перед использованием порошки проходили контроль на универсальном лазерном приборе измерения размера частиц модели FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTecplus и анализаторе субмикронных частиц Beckman COULTER №5. Для приготовления шихты использовали двухконусный смеситель марки RT-NM05S (Тайвань). Прессование осуществлялось на гидравлическом прессе модели TS0500-6 (Китай) в лабораторных пресс-формах. Образцы получали запрессовкой заранее упрочненного порошкового штифта ø 3 мм в шихту карбонильного никеля или NiO с дисперсностью 5–10 мкм. Восстановительный отжиг образцов осуществляли в муфельной лабораторной печи SNOL 6,7/1300 при температуре 700 °C и отжиг–спекание при 1050, 1150, 1250 °C в атмосфере водорода в течение 9 часов.

Фиксирование микроструктуры выполнялось на оптическом микроскопе «NEOPHOT-21». Тонкое строение структуры изучали на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N. Распределение концентрации элементов в диффузионной зоне Fe-Ni изучали методом локального рентгеноспектрального анализа на установке «Камебакс».

Результаты исследования. Пористость порошкового компонента после прессования составляла 12 %. Диффузия в системе железо-порошок никеля, восстановленном из оксида, в 5–10 раз выше, чем при использовании порошка карбонильного никеля. Установлено, что высокая скорость диффузии восстановленного никеля приводит к более быстрому и равномерному проникновению легирующих элементов в материал. Определены зависимости распределения концентрации никеля и его оксида после спекания, а также рассчитаны показатели диффузионного взаимодействия между железом, никелем и оксидом никеля после операции отжига, при котором происходит восстановление оксида никеля и спекание при различных температурах.

Обсуждение и заключение. Анализ полученных результатов свидетельствует о различной интенсивности диффузионных процессов в порошковых легированных сталях. Объясняется это как искаженностью кристаллической решетки исходных материалов, так и увеличенной сегрегацией дефектов (содержанием дефектных зон), которые образуются в процессе уплотнения материала. Данный подход к исследованию двухкомпонентной диффузии позволил сопоставить интенсивности диффузионного перераспределения элементов в зависимости от химического состава и температуры, а также оценить эффективную энергию активации диффузии. В результате выполненных исследований установлены количественные параметры распределения концентрации Ni в железную основу в зависимости от температуры спекания, влияющие на формирование качественного материала. Полученные результаты исследований интересны специалистам в области порошковой металлургии и термической обработки при разработке новых многокомпонентных сплавов.

Ключевые слова: порошковые стали, оксид никеля, никель, диффузия, структрообразование, спекание, сращивание, контактное сечение, механические свойства

Благодарности. За помощь в получении и обсуждении результатов авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам кафедры НИТУ МИСИС «ПМиФП» и лично В.Ю. Лопатину; сотрудникам кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ: д.т.н., профессору В.Н. Пустовойту, д.т.н., профессору Ю.М. Домбровскому; сотрудникам кафедры «Технология машиностроения, технологические машины и оборудование» ЮРГТУ (НПИ) имени М.А. Платова и лично В.Ю. Дорофееву.

Для цитирования. Егоров М.С., Егорова Р.В., Еремеева Ж.В. Диффузионные процессы в формировании структуры и свойств легированных порошковых сталей. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(2):78–89. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-78-89

Research Article

Diffusion Processes in the Formation of the Structure of Alloyed Powder Steels

Maxim S. Egorov[1] ✉, **Rimma V. Egorova**[1], **Zhanna V. Eremeeva**[2]

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] National Research Technical University "MISIS", Moscow, Russian Federation

✉ aquavdonsk@mail.ru

Abstract

Introduction. The production of alloyed powder steels continues to be one of the most promising areas in domestic powder metallurgy. This is due to the high level of performance characteristics and the wide range of products that can be produced. Creating materials with desired properties is a complex process that involves various phenomena. One of these phenomena is the diffusion alloying of iron-based powder steels, which plays a special role in this process. The creation of alloyed powder steels in the Fe-NiO and Fe-Ni systems is important for metallurgy and metalworking, as they are used for coating and sintering to obtain materials with specific properties. In addition, the diffusion of nickel in iron during heat treatment is considered to improve material properties. Recent advances in the study of mutual diffusion are associated with the investigation of homogeneous systems. However, mutual diffusion even in single crystals always occurs under spatially inhomogeneous conditions. The modern literature has not sufficiently studied the mutual diffusion in two- and multi-component powder systems. Therefore, the aim of this work is to determine the effect of diffusion alloying with nickel and nickel oxide of iron-based powder steel on the processes of obtaining powder materials. Within the framework of this goal, the following tasks were set: to investigate the diffusion processes of interactions between pairs in the Fe-NiO and Fe-Ni systems, as well as to study technological modes of sintering and reducing annealing of samples in order to achieve maximum mechanical properties that would ensure the formation of a high-quality product.

Materials and Methods. The work used iron powder of the PZHRV 2.200.26 brand manufactured by PJSC Severstal (Cherepovet) and carbonyl nickel powder PNK-UT3, obtained by the electrolytic method or splitting nickel salt with an aqueous solution, according to GOST 97922–97. Before use, the powders were tested using a universal laser particle size measuring device model FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTecplus and a Beckman COULTER No. 5 submicron particle analyzer. A two-cone mixer RT-NM05S (Taiwan) was used to prepare the charge. Pressing was carried out on a hydraulic press model TS0500–6 (China) in laboratory molds. Samples were obtained by pressing pre-hardened 3 mm diameter powder pins into a carbonyl nickel or NiO charge with a dispersion of 5–10 microns. Recovery annealing was carried out in a SNOL 6.7/1300 laboratory muffle furnace at 700°C, followed by annealing-sintering at temperatures of 1050, 1150 and 1250°C in a hydrogen atmosphere for 9 hours.
Microstructural analysis was performed using a NEOPHOT-21 optical microscope. A Hitachi S-3400N scanning electron microscope was used to study the fine structure of the material. The distribution of element concentrations in the Fe-Ni diffusion zone was studied by local X-ray spectral analysis using the Kamebaks installation.
Results. The studies showed that the porosity of the powder component after pressing was 12%. Diffusion in the iron-nickel powder system was 5–10 times higher when using carbonyl nickel compared to oxide. It was also found that high diffusion rates of reduced nickel led to faster and more uniform penetration of alloying elements into the material. The dependences of the distribution of nickel concentration and its oxide content after sintering were determined, as well as the indicators of diffusion interaction between iron, nickel, and nickel oxide during annealing, where nickel oxide was reduced and sintering occurred at different temperatures.
Discussion and Conclusion. The analysis of the results obtained indicates a different intensity of diffusion processes in powder-alloyed steels. This can be explained by both the distortion of the crystal lattice of the starting materials and the increased segregation of defects, such as defective zones, that are formed during compaction of the material. This approach to studying two-component diffusion allowed us to compare the intensity of element diffusion redistribution depending on chemical composition and temperature, and to estimate the effective activation energy of diffusion. As a result of our studies, we have established quantitative parameters for the distribution of nickel concentration in the iron matrix, depending on sintering temperature, which affects the formation of high-quality materials. The research results obtained are of interest to specialists in powder metallurgy and heat treatment, as they can be used in the development of new multicomponent alloys.

Keywords: powder steels, nickel oxide, nickel, diffusion, structure formation, sintering, splicing, contact section, mechanical properties

Acknowledgements. The authors would like to express their sincere gratitude for the assistance provided by the staff of the Powder Metallurgy and Functional Coatings Department at NUST MISIS, especially V.Yu. Lopatin, as well as the staff of the Materials Science and Metal Technology Department at Don State Technical University, including Dr.Sci. (Eng.), Professor V.N. Pustovoit and Dr.Sci. (Eng.), Professor Yu.M. Dombrovsky. They would also like to thank the staff of the Mechanical Engineering and Technological Machines and Equipment Department at Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) and V.Yu. Dorofeev from for their assistance.

For Citation. Egorov MS, Egorova RV, Eremeeva ZhV. Diffusion Processes in the Formation of the Structure of Alloyed Powder Steels. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(2):78–89. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-78-89

Введение. Эксплуатационные свойства материала, как компактного, так и порошкового, в основном определяются химическим составом и состоянием структуры [1, 2]. В зависимости от назначения к микроструктуре предъявляют специфические требования [3]. Образование той или иной структуры порошковой стали в процессе спекания зависит также от процессов, протекающих при спекании и последующей термической обработке [4]. Процесс структурообразования порошковых материалов подвержен влиянию множества факторов [5]. Согласно [6] основными факторами являются методы их получения, гранулометрический состав, давление прессования, среда и время спекания, температура деформационного воздействия. Введение легирующих элементов, оказывающих влияние на процессы в поверхностных слоях частиц при твердофазном спекании, и присадок, образующих жидкую фазу, является наиболее эффективным способом повышения уровня эксплуатационных свойств [7]. Каждый из факторов имеет свои преимущества и недостатки.

Высоким уровнем эксплуатационных свойств обладают порошковые легированные стали. Они характеризуются однородной структурой и гомогенным распределением легирующих элементов по всей структуре стали [8]. При пропитке жидкими металлами, например, при использовании процесса цементации или карбонитрования легирующие элементы поглощаются поверхностными слоями материала. Это может

привести к формированию поверхностного слоя с высокой концентрацией легирующих элементов, но более глубокие слои могут оказаться менее насыщенными. Поэтому в таких случаях пропитка жидкими металлами наиболее эффективна для создания поверхностного слоя с желаемыми свойствами [9]. Диффузионное насыщение также может привести к неравномерному распределению легирующих элементов. Диффузия может быть ограничена только поверхностными слоями материала или внутренними дефектами, что ограничивает равномерность насыщения по всему объему детали. Выбор метода легирования зависит от цели, требуемых свойств, размера и формы детали, доступных ресурсов и других факторов, и он должен быть тщательно рассмотрен с учетом всех этих факторов.

Хорошо зарекомендовал себя способ введения никеля в порошковые конструкционные стали в виде добавок дисперсных оксидов никеля [10]. Восстановительный отжиг шихты на основе железа с равномерно распределенными в ней частицами NiO приводит к восстановлению и закреплению восстановившихся частиц никеля на железных частицах путем поверхностной и зернограничной диффузии. Применение такого частично легированного порошка позволяет при более низкой температуре получать детали с однородной структурой и высоким комплексом механических свойств. Активирование процесса гомогенизации порошковых сталей при использовании оксидов легирующих элементов в литературе объясняется только на качественном уровне [11]. Поэтому целью данной работы стало изучение процессов диффузионного взаимодействия в системах Fe-Ni и Fe-NiO для определения количественных параметров диффузии в них. Основной задачей в рамках поставленной цели явилось исследование влияния технологических режимов спекания и диффузионного отжига при диффузионном взаимодействии в системе пар Fe-Ni и Fe-NiO на формирование качественной порошковой стали.

Материалы и методы. В работе использовали порошок ПЖРВ 2.200.26, производства ПАО Северсталь (г. Череповец) и никелевый карбонильный порошок ПНК-УТ3 ГОСТ 97922-97, получаемый электролитическим методом или путем расщепления никелевой соли водным раствором [12]. Данные об общем химическом составе представлены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав порошка ПЖРВ 2.200.26

Марка порошка	Массовое содержание компонентов, %									
	Mo	Ni	C	O	H	Cu	Si	Mn	P	S
ПЖРВ 2.200.26	–	–	0,09	0,14	–	–	0,014	0,087	0,012	0,005

Технологические свойства порошка ПЖРВ 2.200.26: насыпная плотность — от 2,4 до 3,0 г/см^3; текучесть — не более 37 сек/50 г; плотность при Р=700 МПа — 7,0–7,05 г/см^3; прочность при плотности 6,5 г/см^3 — более 14 Н/мм^2. Аналогом являются порошки шведской фирмы Höganäs: AHC 100.29, NC 100.24, SC 100.26, ASC100.29. Область применения: детали амортизационной группы, детали трансмиссии, корпусные детали, шестерни, шатуны, муфты, втулки и др. К основным качествам порошка из никеля марки ПНК-УТ3 относят высокую коррозийную стойкость и устойчивость к агрессивным средам.

Порошковые композиции отличает высокая интенсивность граничных и поверхностных процессов, что при диффузии может привести к интенсификации массопереноса [13]. Проведено исследование закономерности структурообразования порошковых материалов. Моделирование процессов диффузионного взаимодействия легирующих компонентов производилось методом диффузионных пар [14].

Определение гранулометрического состава железного порошка марки ПЖРВ 2.200.26 было проведено на универсальном лазерном приборе измерения размера частиц модели FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTecplus (Германия) и анализаторе субмикронных частиц Beckman COULTER №5 (США).

Диффузионные процессы рассматривались на модельных парах порошков марок ПЖРВ 2.200.26 (порошок) – Ni (карбонильный); ПЖРВ 2.200.26 (порошок) – NiO, которые изготавливали методом запрессовки стержня из материала ПЖРВ 2.200.26 диаметром 3 мм в порошок карбонильного Ni или NiO дисперсностью 5–10 мкм. Проводили восстановительный отжиг образцов-пар при температуре 700 °С и отжиг-спекание при 1050 °С, 1150 °С, 1250 °С в атмосфере водорода в течение 9 часов [8].

Пара Fe-Ni относится к системам с неограниченной растворимостью компонентов. Железо и никель при температуре диффузионного отжига обладают ГЦК-решетками с близкими параметрами и образуют твердые растворы замещения. При охлаждении сплавы железа, содержащие менее 6 % никеля, перекристаллизовываются в ферритную фазу с ОЦК-решеткой. Металлографические исследования проводились после отжига с предварительной подготовкой шлифов в плоскости, перпендикулярной к исходной границе между компонентами пары.

Распределение концентрации элементов в диффузионной зоне Fe-Ni изучали методом локального рентгеноспектрального анализа на установке «Камебакс» производства Cameca (Франция). Съемку проводили в плоскости шлифа в направлении, перпендикулярном исходной границе между компонентами пары (вдоль оси первичного цилиндрического образца железа). С каждого шлифа по сечению диффузионной зоны с шагом 1 мкм записывали четыре концентрационные кривые распределения относительных интенсивностей $К_{a1}$ линии железа и никеля. Устанавливали содержание никеля и железа в каждой исследуемой точке концентрационной кривой. Формирование диффузионной зоны увеличивается в 1,6–2,2 за счет присутствия оксида никеля в паре с железом по сравнению с чистым никелем [15]. Коэффициенты взаимной диффузии $\overline{D}$ при спекании в интервалах 1050 °C–1250 °C определялись в зависимости от содержания легирующих элементов [16].

Фиксирование микроструктуры выполнялось на оптическом микроскопе «NEOPHOT–21» Carl Zeiss Jena (Германия). Тонкое строение структуры изучали на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N (Тайвань).

Расчёты проводили с помощью математических вычислений по методу Матано [15].

Результаты исследования. Пористость порошкового компонента после прессования составляла 12 %. Гранулометрический состав железного порошка марки ПЖРВ 2.200.26 определен на гистограмме: наблюдается единственный пик, свидетельствующий о том, что порошок монофракционный (рис. 1). Средний размер частиц 98,5 мкм. Результаты представлены в таблице 2.

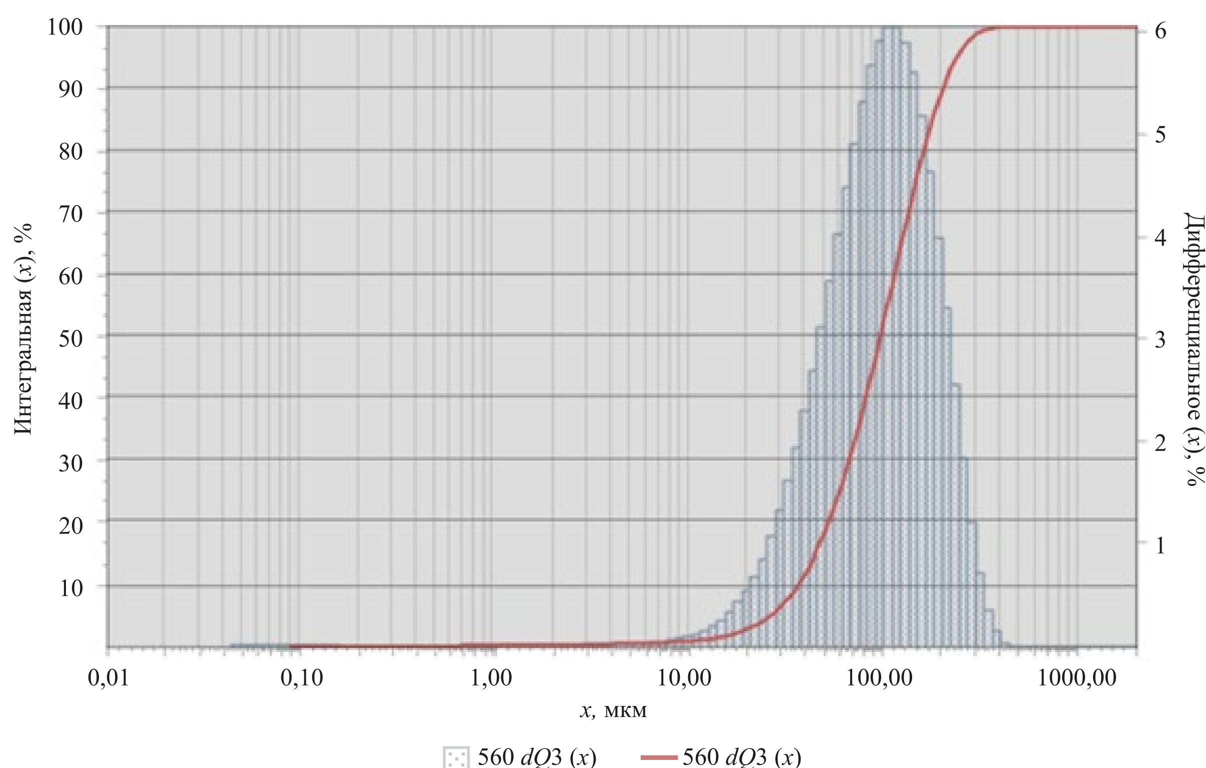


Рис. 1. Гранулометрический состав железного порошка ПЖРВ 2.200.26

Таблица 2

Гранулометрический состав железного порошка ПЖРВ 2.200.26

Количественная доля, %	5	10	25	50	75	90	95	99
Размерность, мкм	26,5	37,0	60,7	98,5	149,8	206,4	244,0	317,4

На рис. 2 *а* и *б* представлен общий вид порошка железа марки ПЖРВ 2.200.28. На рис. 2 *в, г, д, е, ж, з* представлена морфология частиц порошка железа, полученная на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N.

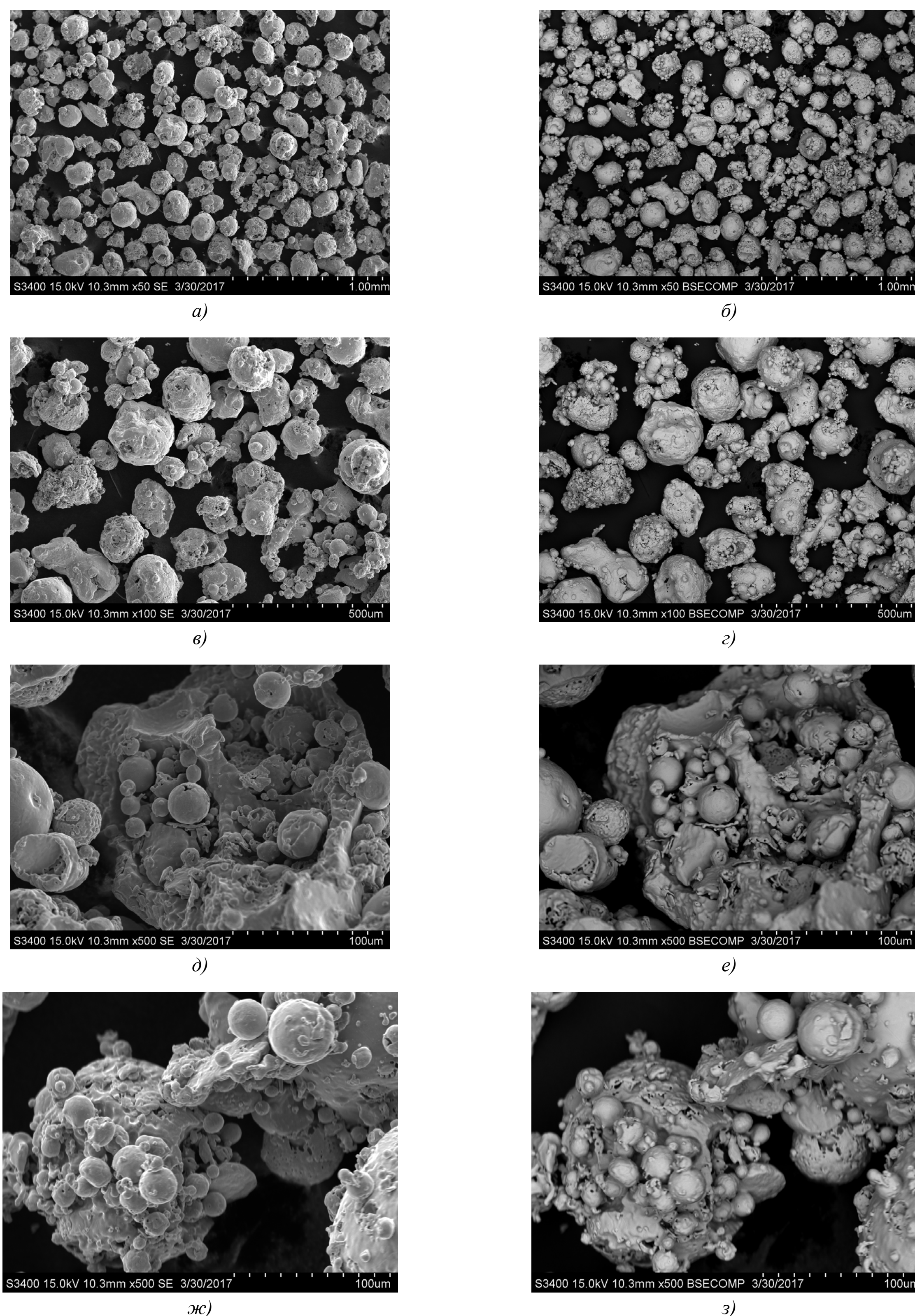


Рис. 2. РЭМ-изображение порошка железа ПЖРВ 2.200.28 съемка в:
а, в, д, ж — отраженных электронах; *б, г, е, з* — во вторичных электронах

Структура диффузионных зон состоит из ферритной и аустенитной фаз, разделенных границей. При температуре спекания 1 050 °С наблюдается пористая аустенитная фаза (особенно в образцах, содержащих оксид NiO), обусловленная высокими отрицательными объемными эффектами в процессе восстановления NiO. К более интенсивному уплотнению приводит спекание при повышении температуры до 1 150 °С и 1 250 °С, причем интенсификация наблюдается в образцах, восстановленных из оксида Ni. Значительное увеличение объемной текучести материала после восстановления частиц оксида никеля объясняется увеличенной структурной неравномерностью и неправильным расположением дислокаций, в сравнении со структурой

порошкового материала с частицами никеля. Последние отличаются равномерным расположением дислокаций, которые в меньшей степени подвержены аннигиляции при предварительном отжиге. Восстановление оксида никеля сопровождается движением межчастичной поверхности сращивания, что приводит к формированию дефектной структуры. В процессе восстановления NiO в объеме мигрирующей границы NiO-Ni образуется усложненная структура за счет разоориентированных дислокаций, которые не исчезают даже больших температурах спекания (рис. 3).

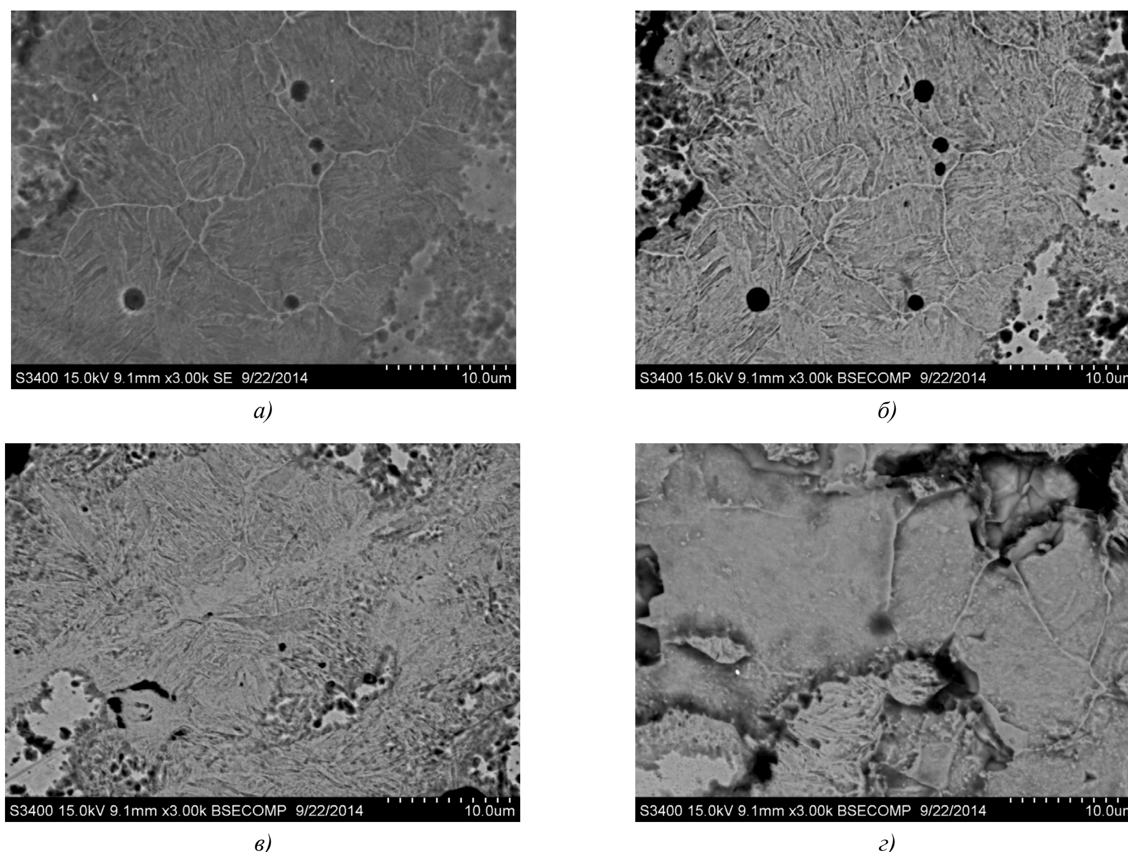


Рис. 3. Микроструктуры сплава из порошка марки ПЖРВ 2.200.26
при введении в исходную шихту Ni в количестве:
а, б — 20 %; *в, г* — 40 % при температуре спекания 1 150 °С

Диффузия никеля в порошковое железо наиболее активно протекает по границам зерен с отклонением вглубь зерна. Это связано с более низкой энергией активации процесса зернограничной диффузии по сравнению с объемной. Высокая диффузионная проницательность границ зерен обусловлена их дефектной структурой. Преимущественное растворение никеля по границам зерен железа в большей степени проявляется при низкой температуре спекания (1 050 °С), когда объемная диффузия затруднена (рис. 4, 5).

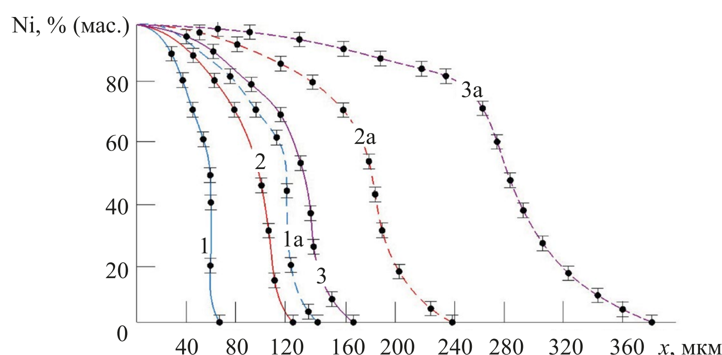


Рис. 4. Распределение концентрации Ni в диффузионной зоне пар Fe-Ni (сплошная линия 1, 2, 3)
и Fe-NiO (пунктирная линия 1 *а*, 2 *а*, 3 *а*) после спекания в атмосфере водорода при температурах:
1, 1 *а* — 1 050 °С; 2, 2 *а* — 1 150 °С; 3, 3 *а* — 1 250 °С

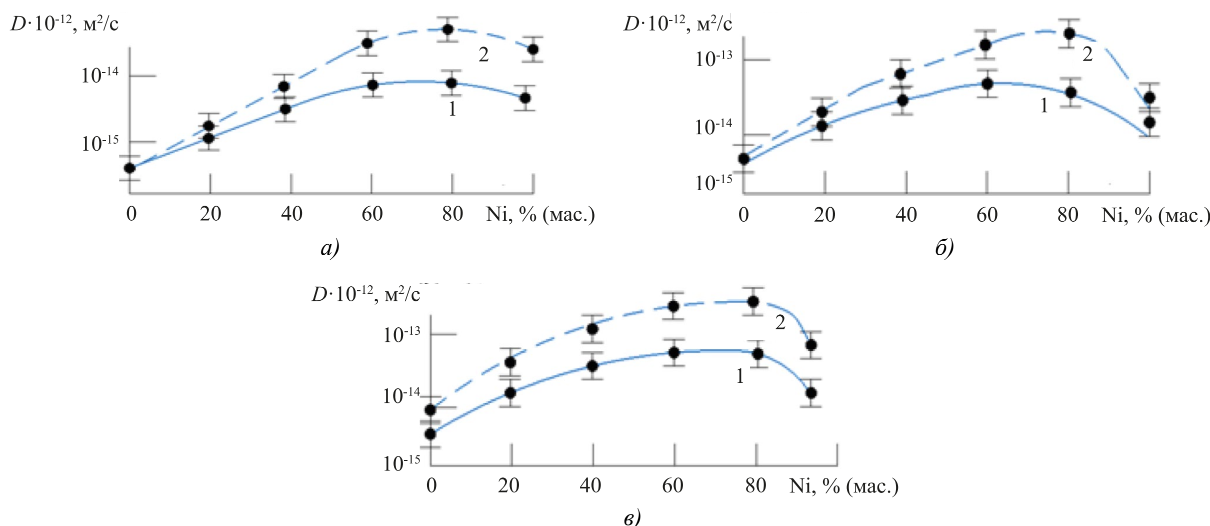


Рис. 5. Зависимости коэффициентов взаимной диффузии Fe-Ni (линия 1)
и Fe-NiO (линия 2) после отжига и спекания при температурах:
а — 1 050 °С, *б* —1 150 °С, *в* — 1 250 °С

На всех кривых коэффициент взаимной диффузии имеет максимум при концентрации никеля более 60 %. Эти данные совпадают с результатами работы, в которой проанализированы коэффициенты взаимной диффузии путем конечно-элементного моделирования простой модели. При температурах спекания 1 050 и 1 150 °С в этом интервале концентраций коэффициент взаимной диффузии в паре Fe-NiO примерно в 10 раз выше, чем в паре Fe-Ni [17]. При увеличении температуры спекания до 1 250 °С это различие существует во всем интервале концентраций, что также подтверждается результатами работы [18] и представлено на рис. 6.

Энергия активной диффузии $\overline{E}$ и предэкспоненциальный множитель $\overline{D_0}$ определялись на основе температурных зависимостей коэффициентов взаимной диффузии в соответствии с формулой Аррениуса [6]:

$$\overline{D} = \overline{D_0}\, exp - \frac{\overline{E}}{RT} \qquad (1)$$

Диффузионная энергия во всех рассматриваемых случаях получилась меньше приведенных в литературе [17] значений для компактных материалов.

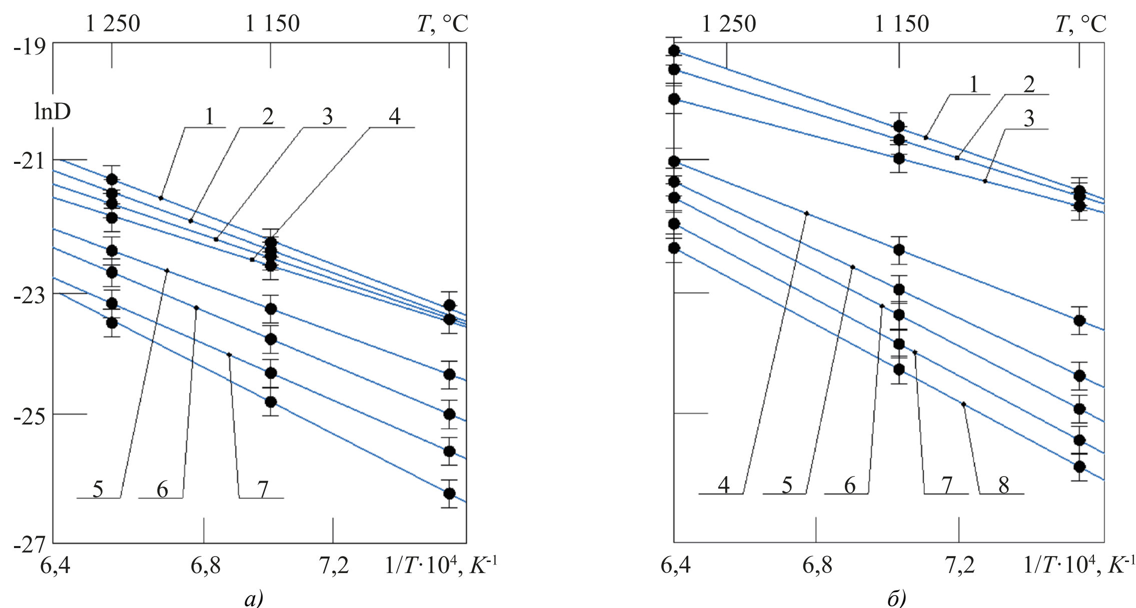


Рис. 6. Температурные зависимости коэффициентов взаимной диффузии:
а — системы Fe-Ni; *б* — системы Fe-NiO от концентрации NiO:
1 — 90 %, 2 — 80 %, 3 — 70 %, 4 — 50 %,
5 — 40 %, 6 — 30 %, 7 — 20 %, 8 — 10 %

На увеличение процессов поверхностной и зернограничной диффузии, реализующихся по механизмам с малыми энергиями активации, а также диффузии по дефектам оказывает влияние пористость и структурная активность порошкового никелевого компонента. Энергия активации (рис. 7) и предэкспоненциальный множитель имеют минимум в области концентрации 50–70 % Ni (рис. 8). Значения $\overline{E}$ подходят для систем Fe-NiO и NiO. Предэкспоненциальный множитель $\overline{D_0}$ в системе Fe-NiO значительно больше, чем в системе железо-никель, увеличивает коэффициент взаимной диффузии элементов при восстановительном отжиге и спекании. При термомеханическом воздействии, как и при диффузии углерода в кристаллическую решетку железа, происходит смещение межчастичной поверхности сращивания, что может послужить началом развития трещины [19]. Это связано с повышенной дефектностью структуры никеля после восстановления, что подтверждается данными рентгенографического анализа [19]. Плотность дислокаций порошка никеля, восстановленного из оксида при температуре 700 °С, составляет $1{,}8{\cdot}10^{10}$, а карбонильного никеля — $1{,}0{\cdot}10^{8}$ см$^{-2}$.

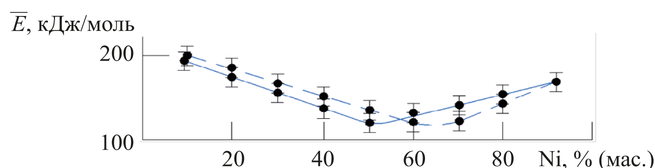


Рис. 7. Энергия активации взаимной диффузии $\overline{E}$ (кДж/моль) в системах Fe-Ni (пунктирная линия) и Fe-NiO (сплошная линия)

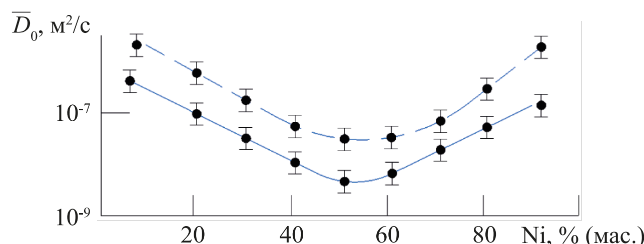


Рис. 8. Предэкспоненциальный множитель $\overline{D_0}$ (м^2/с) в системах Fe-Ni (пунктирная линия) и Fe-NiO (сплошная линия)

Обсуждение и заключение. Процесс диффузионного отжига образцов, полученных из железного порошка ПЖРВ 2.200.26, сопровождается так называемым «эффектом Френкеля», когда атомы, ионы или дефекты в кристаллическом материале могут перемещаться или диффундировать при повышенной температуре. Во время диффузионного отжига возможны диффузия и рекомбинация дефектов, таких как вакансии (отсутствие атома в кристаллической решетке) и вакансионные дефекты (атомы на неправильных местах в кристаллической решетке). В результате этого кристалл может преобразовываться или избавляться от этих дефектов. При соседстве вакансии и вакансионного дефекта образуется пара Френкеля. Эта пара может перемещаться в кристалле путем диффузии и, если пара Френкеля встречает одну из этих вакансий, она может уничтожить два дефекта и таким образом очистить кристалл от дефектов.

При спекании легированных порошковых сталей происходит взаимная диффузия атомов между порошковыми частицами и образование связей на межфазных границах. Диффузия легирующих элементов в порошковых сталях приводит к формированию интерметаллических соединений и образованию дисперсионных и основных фаз. Диффузионные процессы могут быть ускорены при повышенных температурах спекания.

В результате выполненных исследований установлены количественные параметры распределения концентрации Ni в железную основу в зависимости от температуры спекания. Минимальное расстояние, на которое распределяется никель, составляет 70 мкм при температуре спекания 1 050 °С. При спекании 1 250 °С, зона распределения чистого никеля увеличивается до 165 мкм. Однако при использовании оксида никеля эта зона увеличивается свыше 360 мкм при той же температуре. Это свидетельствует от том, что диффузия в системе с порошком никеля, восстановленным из оксида, в 5–10 раз выше, чем при использовании порошка карбонильного никеля. Это может иметь важное значение при процессах легирования или насыщения материалов. Высокая скорость диффузии восстановленного никеля может привести к более быстрому и равномерному проникновению легирующих элементов в материал. Это может быть полезно при создании поверхностного слоя с определенными свойствами или увеличении прочности и других механических свойств материала.

Анализ полученных результатов свидетельствует о различной интенсивности диффузионных процессов в порошковых легированных сталях, что связано не только с искаженностью кристаллической решетки исходных материалов, но и с повышенной концентрацией дефектов, получаемой в процессе прессования заготовок. В целом понимание диффузионных процессов и их влияния на формирование структуры легированных порошковых сталей позволяет оптимизировать процессы спекания и получать материалы с желаемыми свойствами и микроструктурой. Таким образом, выбор между порошком никеля, восстановленным из оксида, и порошком карбонильного никеля должен быть основан на конкретных требованиях и условиях процесса. Дальнейшие исследования и эксперименты могут помочь более полно изучить применимость таких вариантов и определить наиболее эффективный метод для конкретной задачи

Список литературы / References

1. Гасанов Б.Г., Жердицкий Н.Т., Сиротин П.В., Юханаев А.М. Гомогенизация среднелегированной порошковой стали. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2013;(3(172)):25–28.

Gasanov BG, Zherditsky NT, Sirotin PV, Juhanaev AM. Homogenization of Medium Alloy Powder Steel. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences.* 2013;(3(172)):25–28. (In Russ.).

2. Шоршоров М.Х., Гвоздев А.Е., Золотухин В.И., Сергеев А.Н., Калинин А.А., Бреки А.Д. и др. *Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов*. Тула: Тульский государственный университет; 2016. 235 с.

Shorshorov MKh, Gvozdev AE, Zolotukhin VI, Sergeev AN, Kalinin AA, Breki AD, et al. *Development of Advanced Technologies for the Production and Processing of Metals, Alloys, powder and Composite Nanomaterials.* Tula: Tula State University; 2016. 235 p. (In Russ.).

3. Петросян А.С., Галстян Л.З. Особенности термической обработки порошковых сталей марки П40ХН с повышенными свойствами. *Вестник национального политехнического университета Армении. Металлургия, материаловедение, недропользование*. 2017;(2):40–48.

Petrosyan HS, Galstyan LZ. Peculiarities of Heat Treatment of the П40ХН – Grade Powder Steels with Improved Properties. *Proceedings of NPUA. Metallurgy, Material Science, Mining Engineering* 2017;(2):40–48. (In Russ.).

4. Дорофеев В.Ю., Свиридова А.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н., Кочкарова Х.С. Тамадаев В.Г. Особенности термической обработки микролегированных горячедеформированных порошковых сталей. В: *Труды 12-го Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка.» Минск, 07–09 апреля 2021 года*. В 2-х частях. Часть 1. Минск: Республиканское унитарное предприятие "Издательский дом "Белорусская наука"; 2021. С. 184–197.

Dorofeev VYu, Sviridova AN, Berezhnoi YuM, Bessarabov EN, Kochkarova KhS. Tamadaev VG. Features of Heattreatment of Microalloyed Hot-Deformed Powder Steels. In: *Proceedings of the 12th International Symposium “Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding”. Minsk, April 07–09, 2021.* In 2 parts. Part 1. Minsk: Respublikanskoe unitarnoe predpriyatie “Izdatel'skii dom “Belorusskaya nauka”; 2021. P. 184–197. (In Russ.).

5. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В. Порошковая металлургия в Беларуси и мировые тенденции развития. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2019;(1):98–106. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-98-106

Vityaz PA, Ilyuschenko AF, Savich VV. Powder Metallurgy in Belarus and Global Development Trends. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2019;(1):98–106. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-98-106 (In Russ.).

6. Гуревич Ю.Г., Анциферов В.Н., Савиных Л.М., Оглезнева С.А., Буланов В.Я. *Износостойкие композиционные материалы.* Екатеринбург: Уральское отделение РАН; 2005. 216 с.

Gurevich YuG, Antsiferov VN, Savinykh LM, Oglezneva SA, Bulanov VYa. *Wear-Resistant Composite Materials*. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005. 216 p. (In Russ.).

7. Скориков А.В., Климов Ю.Е., Ульяновская Э.В. Кинетика формирования диффузионных слоев при хромировании порошковых сталей в расплавах солей с нагревом токами высокой частоты. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2014;(2(177)):7881. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kinetika-formirovaniya-diffuzionnyh-sloev-pri-hromirovanii-poroshkovyh-staley-v-rasplavah-soley-s-nagrevom-tokami-vysokoy-chastoty/viewer (дата обращения: 01.03.2024).

Skorikov AV, Klimov YuE, Ulyanovskaya EV. Kinetics of Diffusion Layers the Plating of Powder Steels in Molten Salt With Heating by High-Frequency Currents. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences.* 2014;(2(177)):7881. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kinetika-formirovaniya-diffuzionnyh-sloev-pri-hromirovanii-poroshkovyh-staley-v-rasplavah-soley-s-nagrevom-tokami-vysokoy-chastoty/viewer (accessed: 01.03.2024) (In Russ.).

8. Дьячкова Л.Н. Особенности формирования структуры и свойств порошковых сталей с добавками, активирующими диффузионные процессы при спекании. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук.* 2020;65(1):43–53. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-43-53

Dyachkova LN. Features of the Formation of the Structure and Properties of Powder Steels with Additives that Activate Diffusion Processes during Sintering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series.* 2020;65(1):43–53. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-43-53 (In Russ.).

9. Скориков А.В., Ульяновская Э.В. Кинетика формирования диффузионных слоев при поверхностном легировании хромом порошковых сталей методом электролиза ионных расплавов солей. В: *Труды III международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» С. Петербург-Челябинск-Новочеркасск-Владивосток, 16–19 мая 2017 года.* Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; 2017. С. 94–97.

Skorikov AV, Ulyanovskaya EV. Kinetics of the Formation of Diffusion Layers during Surface Chromium Alloying of Powder Steels by Electrolysis of Ionic Melts of Salts. In: *Proceedings of the III International Scientific and Technical conference "Prom-Engineering", St. Petersburg-Chelyabinsk-Novocherkassk-Vladivostok, May 16–19, 2017*. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center; 2017. P. 94–97. (In Russ.).

10. Гасанов Б.Г., Ефимов А.Д., Юханаев А.М. Феноменология взаимной диффузии в межслойных зонах при спекании порошковых биметаллических материалов. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2013;(5(174)):26–29. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fenomenologiya-vzaimnoy-diffuzii-v-mezhsloynyh-zonah-pri-spekanii-poroshkovyh-bimetallicheskih-materialov/viewer (дата обращения: 01.03.2024).

Gasanov BG, Efimov AD, Yukhanaev AM. Phenomenology of Mutual Diffusion in Interlayer Zones during Porous Bimetal Materials Sintering. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences.* 2013;(5(174)):26–29. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fenomenologiya-vzaimnoy-diffuzii-v-mezhsloynyh-zonah-pri-spekanii-poroshkovyh-bimetallicheskih-materialov/viewer (accessed: 01.03.2024) (In Russ.).

11. Rojek J, Nosewicz S, Mazdziarz M, Kowalczyk P, Wawrzyk K, Lumelskyj D. Modeling of a Sintering Process at Various Scales. *Procedia Engineering.* 2017;177:263–270. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.02.210

12. Егоров М.С., Егорова Р.В. Развитие межчастичного сращивания при спекании металлических порошков с добавлением углерода. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;(3):55–65. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-55-65

Egorov MS, Egorova RV. Development of Interparticle Bonding during Sintering of Metal Powders with the Addition of Carbon. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(3):55-65. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-55-65

13. Михеев А.А., Зеер Г.М., Королева Ю.П., Зеленкова Е.Г., Сартпаева А.Б. Формирование микроструктуры и переходной зоны при диффузионной сварке стали 45 через порошковый слой. *Сварочное производство.* 2015;(9):18–21.

Mikheev AA, Zeer GM, Koroleva YuP, Zelenkova EG, Sartpaeva AB. Formation of the Microstructure and Transition Zone during Diffusion Welding of Steel 45 Through a Powder Layer. *Svarochnoe proizvodstvo.* 2015;(9):18–21. (In Russ.).

14. Дорофеев В.Ю., Свиридова А.Н., Свистун Л.И. Влияние микролегирования натрием на контактную выносливость и механические свойства горячедеформированных порошковых сталей. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2019;(4):4–13. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-4-13

Dorofeyev VYu, Sviridova AN, Svistun LI. The Effect of Sodium Microalloying on the Rolling Contact Fatigue and Mechanical Properties of Hot-Deformed Powder Steels. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2019;(4):4–13. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-4-13 (In Russ.).

15. Буланов В.Я., Крашанинин В.А., Оглезнева С.А. О процессе гомогенизации легирующих элементов в наносистемах Fe-Mo, Fe-Cu, Fe-Cr, Fe-Ni в зависимости от температуры и времени спекания. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2008;(2):50–55.

Bulanov VYa, Krashaninin VA, Oglezneva SA. On Process of Alloying Element Homogenization in the Fe-Mo, Fe-Cu, Fe-Cr, Fe-Ni Nanosystems Depending on Temperature and Sintering Time. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2008;(2):50–55. (In Russ.).

16. Gilardi R, Alzati L, Oro R., Hryha E, Nyborg L, Berg S, et al. Reactivity of Carbon Based Materials forPowder Metallurgy Parts and Hard Metal Powders Manufacturing. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy.* 2016;63(7):548–554. https://doi.org/10.2497/JJSPM.63.548

17. Горохов В.М., Гучек В.Н., Тарусов И.Н. Структура и свойства порошковых низколегированных сталей, изготовленных из смесей, содержащих оксиды легирующих элементов, методом прессования и спекания. В кн.: *Порошковая металлургия.* Минск: Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Белорусская наука»»; 2019. P. 5–18. (In Russ.).

Gorokhov VM, Guchek VN, Tarusov IN. Structure and Properties of Powdered Low-Alloy Steels Made from Mixtures Containing Oxides of Alloying Elements by Pressing and Sintering. In book: *Poroshkovaya metallurgiya.* Minsk: Respublikanskoe unitarnoe predpriyatie "Izdatel'skii dom "Belorusskaya nauka"; 2019. P. 5–18. (In Russ.).

18. Егоров М.С., Егорова Р.В., Ковтун М.В. Влияние содержания углерода на формирование контактной поверхности при горячей допрессовке. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;(2):90–101 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101

Egorov MS, Egorova RV, Kovtun MV. Influence of Carbon Content on the Formation of a Contact Interparticle Surface during Hot Post-Pressing. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(2):90–101. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101

19. Dorofeyev VYu, Sviridova AN, Samoilov VA. Formation of Structure and Properties of Hot-Deformed Powder Steels Microalloyed with Sodium and Calcium in the Process of Thermal and Thermomechanical Treatment. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals.* 2021;62(6):723–731 https://doi.org/10.3103/S1067821221060080

Об авторах:

Максим Сергеевич Егоров, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 2126-1642, ORCID, ScopusID, aquavdonsk@mail.ru

Римма Викторовна Егорова, кандидат технических наук, доцент, кафедры кибербезопасности Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8182-6940, ORCID, rimmaruminskaya@gmail.com

Жанна Владимировна Еремеева, доктор технических наук, профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий Национального исследовательского технического университета «МИСИС» (РФ, г. Москва, Ленинский пр. д.4., стр. 1) SPIN-код: 8182-6940, ORCID, ScopusID, ResearcherID, eremeeva-shanna@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

М.С. Егоров — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Р.В. Егорова — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Ж.В. Еремеева — подготовка образцов для исследований на сканирующем микроскопе, анализ результатов микроструктуры и построение математических зависимостей.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 01.03.2024
Поступила после рецензирования 12.03.2024
Принята к публикации 25.03.2024

About the Authors:

Maxim S. Egorov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 2126-1642, ScopusID, ORCID, aquavdonsk@mail.ru

Rimma V. Egorova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Cybersecurity Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 8182-6940, ORCID, rimmaruminskaya@gmail.com

Zhanna V. Eremeeva, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Powder Metallurgy and Functional Coatings Department, National University of Science and Technology MISiS (4, Leninsky Ave., building 1, Moscow, 119049, RF) SPIN-code: 8182-6940, ScopusID, ResearcherID, ORCID, eremeeva-shanna@yandex.ru

Claimed Contributorship:

MS Egorov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, preparation of the text, formulation of the conclusions;

RV Egorova: academic advising, analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions;

ZhV Eremeeva: preparation of samples for research on a scanning microscope, analysis of microstructure results and construction of mathematical dependencies.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 01.03.2024
Revised 12.03.2024
Accepted 25.03.2024